

基于实测数据和卫星数据的黄东海 透明度估测模型研究

禹定峰^{1,2}, 周燕¹, 邢前国³, 盖颖颖¹, 周斌^{1,2}, 樊彦国⁴

(1. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东省海洋环境监测重点实验室, 山东 青岛 266001; 2. 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 山东 青岛 266001; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 4. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 海水透明度是描述水体光学特征的一个重要参数,也是海洋水质调查中的一个重要指标。利用 2 个航次的黄东海透明度数据和 MODIS 遥感反射率数据,进行了黄东海透明度的遥感反演研究,建立了透明度单波段模型、波段比值模型、三波段模型以及基于固有光学特性的半分析模型。结果表明,三波段模型具有较高精度,反演值与实测值之间的平均相对误差为 19%、决定系数为 0.719、均方根误差为 1.47 m。黄东海透明度估测模型的建立,有利于利用遥感影像对黄东海透明度进行全面估测,对于监测黄东海水质状况具有重要意义。

关键词: 透明度; 遥感; 反演; 黄海; 东海

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2016)05-0774-06

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2016.05.023

Retrieval of Secchi disk depth using MODIS satellite remote sensing and in situ observations in the Yellow Sea and the East China Sea

YU Ding-feng^{1,2}, ZHOU Yan¹, XING Qian-guo³, GAI Ying-ying¹, ZHOU Bin^{1,2}, FAN Yan-guo⁴

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environment Monitoring Technology, Qingdao 266001, China; 2. National engineering and technological research center of marine monitoring equipment, Qingdao 266001, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Yantai 264003, China; 4. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Secchi disk depth is an important optical characteristic of water and a vital index in marine water quality survey. In this paper, we developed and adapted empirical and semi-analytical algorithms to estimate Secchi disk depth in the Yellow Sea and the East China Sea. The development of the algorithms is based on in situ observations and MODIS remote sensing reflectance data. The three-band model was most suitable for monitoring Secchi depths in this region, with a determination coefficient (R^2) of 0.719, relative mean square error ($RMSE$) of 1.47 m and a mean relative error (MRE) of 19%. Empirical algorithms proves to be more robust than semi-analytical in this study. Using satellite imagery and the proposed model, one can derive maps of water clarity in the study area.

Key words: Secchi disk depth; remote sensing; retrieval; the Yellow Sea; the East China Sea

透明度是描述水体光学特征的一个重要参数,是海洋水质调查的一个重要指标。透明度的
遥感反演研究对水环境变化、水生生态系统以及
初级生产力具有重要意义。对于大面积的水域,

收稿日期: 2015-12-28, 修订日期: 2016-03-08

基金项目: 国家海洋公益性项目(201505031); 青岛创业创新领军人才计划项目(13-CX-24); 山东省科学院青年基金项目(2013QN006); 中国科学院先导专项(XDA11020403); 山东省科技计划项目(J08LD55); 山东省科学院青年基金项目(2015QN028)

作者简介: 禹定峰(1986-)男, 山东青岛人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋遥感研究, E-mail: xiaoyu_rs@163.com

卫星遥感是水质监测的重要工具。Landsat 系列卫星搭载的 TM 和 ETM+ 被广泛应用于水体透明度的遥感监测^[1-3]。然而, Landsat 较低的重复周期和较高的空间分辨率, 很难实现对大范围区域的快速、准确监测。MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的传感器, 具有 36 个光谱通道, 每 1~2 d 可重复观测地球表面一次。2009 年, 美国 NASA Ocean Biology Process Group (OBPG) 采用 Bailey 等^[4]改进的近红外大气校正算法重新处理了所有水色产品, 其中包括 MODIS-Aqua 数据, 使该数据的精度得到较大提高^[5-6]。然而, 利用 MODIS 数据反演水体透明度则少有报道。

黄东海是典型的二类水体, 由于黄河、长江以及其他河流每年携带大量陆源物质注入该海域, 其浮游植物色素浓度、悬浮物浓度和有色可溶性有机物浓度均高于大洋开阔水体。2007 年以来, 每年均爆发大规模绿潮现象, 不仅给水产养殖和旅游业带来了巨大的经济损失, 而且严重影响着该海域的生态环境^[7]。研究表明, 透明度的变化与水体富营养化和水质有密切关系^[8]。因此, 为监测该海域生态环境的状态, 迫切需要对透明度进行遥感估测, 当务之急是发展针对东中国海切实有效的透明度遥感反演算法。本研究基于地面实测透明度数据和 MODIS-Aqua 遥感反射率数据, 尝试采用经验算法和半分析算法建立适合东中国海区域的透明度反演算法。

1 材料与方法

1.1 透明度数据

海水透明度测量采用塞克盘法, 所用的透明度盘是直径为 30 cm 的黑白四等分圆盘, 测量时间为 2009 年 5 月 15~31 日和 2009 年 6 月 15~20 日, 共采集 62 个站位的透明度数据。所测透明度最大值为 15.6 m、最小值仅为 0.01 m, 平均值为 6.72 m, 标准差为 3.18 m, 基本涵盖了东中国海的水体类型, 具有很好的代表性。水体透明度的测量方法均按照海洋监测规范——中华人民共和国国家标准 GB 17378.4-2007 第四部分的相关规定执行。

1.2 遥感数据

本研究使用的遥感数据为与实测透明度准实时的 MODIS-Aqua 遥感反射率三级产品, 中心波长分别在 412 nm、443 nm、469 nm、488 nm、531

nm、547 nm、645 nm、667 nm 和 678 nm, 空间分辨率均为 4 km, 时间分辨率为 8 d, 覆盖范围为 22°~41°N、117°~131°E 的区域, 行数和列数分别为 8640 和 4320。

1.3 匹配方法

采取以下策略对实测透明度数据与遥感反射率数据进行时空匹配: ①遥感反射率是负值的不参与分析, 在数据处理前即给予剔除; ②采用一个 3×3 像元窗口取遥感反射率的均值, 用均值代替单个像元值的作用在于: 去除数据噪声, 增强像元值的代表性以及空间异质性引起的可能误差。

2 结果与讨论

2.1 经验算法研究

首先通过遥感数据与实测透明度数据的时空匹配, 最终有 39 个站位得以匹配, 之后再分析透明度与遥感反射率的相关性, 以寻求反演水体透明度的特征波段。

透明度与 MODIS-Aqua 10 个波段的遥感反射率相关分析表明, 红光波段的相关系数明显大于蓝绿光波段, 其中中心波长为 678 nm 波段的遥感反射率与透明度的相关系数最大, 为 -0.604 (表 1)。据此建立了基于 678 nm 波段透明度遥感反演的简单线性模型, 该模型的决定系数为 0.4154, 平均相对误差为 31.5%, 均方根误差为 1.96 m。

对于东中国海水体, 红光波段为透明度的敏感区域, 然而就单波段而言, 透明度的特征波段为 678 nm 波段。王晓梅等^[9]在黄、东海的研究表明, 670 nm 附近波段是反演该海域水体透明度的重要波段。此外, 丛丕福等^[10]针对辽东湾水域的研究发现, 667 nm 波段是建立水体透明度遥感反演的重要波段, 要优于传统的蓝绿波段。这些研究成果与本文较为一致, 其原因可能是东中国海域悬浮物浓度较高, 水体较为浑浊, 水体在红波段的后向散射较强, 而水体透明度又与悬浮物含量有关。详细原因, 有待进一步研究。

波段比值算法也是反演水质参数常用的方法, 使用两个波段比值而不是反射率或辐照度, 有利于校正光照、大气等环境背景对测量结果的影响^[11]。在本研究中, 我们分析了所有两波段比值与透明度的相关性, 结果表明, 488 nm 与 555 nm 波段遥感反射率的比值与透明度的相关性最高。

基于以上分析,建立了反演水体透明度的简单线性回归模型(图2),该模型的决定系数为0.6836,平均相对误差为24.3%,均方根误差为1.57 m。

表1 透明度与8 d MODIS-Aqua 遥感反射率的相关性

Tab.1 Correlation between SDD and Rrs of 8 d MODIS-Aqua

SDD/m	412	443	469	488	531	547	555	645	667	678	
SDD/m	1	.077	.013	-.034	-.191	-.604**	-.522**	-.541**	-.507**	-.569**	-.604**
412	.077	1	.841**	.677**	.580**	.214	.374*	.376*	.442**	.473**	.455**
443	.013	.841**	1	.956**	.891**	.441**	.660**	.650**	.625**	.607**	.574**
469	-.034	.677**	.956**	1	.966**	.512**	.758**	.743**	.664**	.609**	.570**
488	-.191	.580**	.891**	.966**	1	.664**	.878**	.862**	.738**	.696**	.658**
531	-.604**	.214	.441**	.512**	.664**	1	.852**	.856**	.769**	.780**	.768**
547	-.522**	.374*	.660**	.758**	.878**	.852**	1	.998**	.904**	.884**	.865**
555	-.541**	.376*	.650**	.743**	.862**	.856**	.998**	1	.915**	.897**	.881**
645	-.507**	.442**	.625**	.664**	.738**	.769**	.904**	.915**	1	.978**	.958**
667	-.569**	.473**	.607**	.609**	.696**	.780**	.884**	.897**	.978**	1	.990**
678	-.604**	.455**	.574**	.570**	.658**	.768**	.865**	.881**	.958**	.990**	1

注: ** .在0.01水平(双侧)上显著相关; * .在0.05水平(双侧)上显著相关

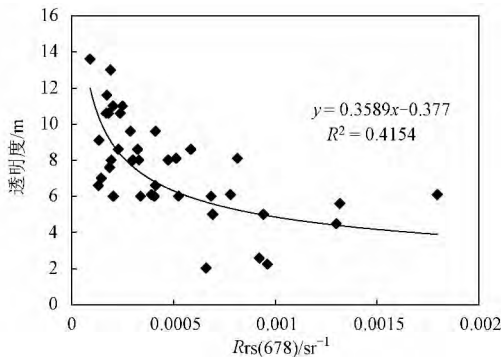


图1 8 d MODIS-Aqua 678 nm 波段与透明度的关系

Fig.1 Relationship between SDD and Rrs at 678 nm of 8 d MODIS-Aqua

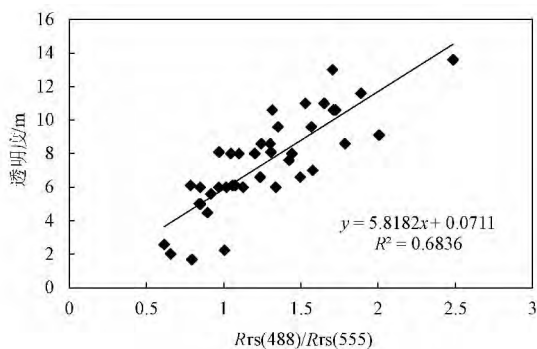


图2 波段比值与透明度的关系

Fig.2 Relationship between SDD and Band Ratio of 8 d MODIS-Aqua

在水色遥感中,除了利用单波段和波段比值反演水质参数外,多波段也常用于水体组分的反

演。所谓的多波段算法,就是利用三个或三个以上不同波段的来反演水体参数。比较典型的是Tassan 在地中海建立的针对浮游植物色素、悬浮物质和黄色物质的三波段反演算法^[12]。王晓梅等^[9]修改了用于悬浮物含量反演的Tassan 模型并将其应用于黄、东海的透明度反演,模型的决定系数达0.95。研究表明490 nm、555 nm和670 nm 等组成的多波段可用于该海域透明度的遥感反演^[9]。然而,在本研究中,通过不同波段组合发现,在反演水体透明度时,基于488 nm、555 nm和678 nm 的三波段组合是所有多波段组合中决定系数最高的。根据以上分析,基于678 nm 波段遥感反射率和488 nm 与555 nm 波段遥感反射率比值,建立了透明度遥感反演的简单线性模型:

$$SDD = 0.921 - 342.766 \times Rrs(678) + 5.346 \times \left[\frac{Rrs(488)}{Rrs(555)} \right] \quad (1)$$

该模型其决定系数为0.716,平均相对误差为19%,均方根误差为1.47 m,反演得到的透明度与实测透明度之间的关系如图3所示。

针对东中国海区域,利用MODIS-Aqua反演的水体透明度单波段、波段比值和三波段算法如表2所示,通过对比三种算法的决定系数、均方根误差和平均相对误差,波段比值算法优于单波段算法,而三波段算法又优于波段比值算法。

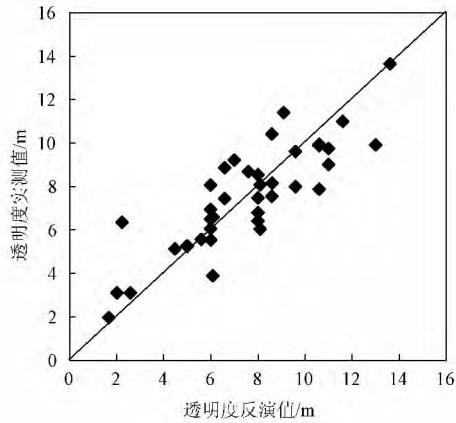


图 3 三波段算法透明度反演值与实测值的对比

Fig.3 SDD Measured versus the Estimated with Multi-Band Model Using MODIS-Aqua

表 2 8 d MODIS-Aqua 反演透明度各算法对比

Tab.2 Algorithms for Retrieving SDD Using 8 d MODIS-Aqua

算法	波长/nm	R ²	RMSE/m	MRE/(%)
单波段	678	0.4154	1.96	31.5
波段比值	488,555	0.6836	1.57	24.3
三波段	488,555,678	0.716	1.47	19

2.2 半分析算法反演

随着透明度遥感反演算法研究的不断深入,研究人员将实测透明度与水体光学性质相结合,根据光在水下的辐射传输理论,建立透明度遥感反演的半分析模式。其中有代表性的是 Doron 等^[13]在 Tyler^[14]和 Preisendorfer^[15]理论的基础上,提出的一种基于 490 nm 光束衰减系数和向下漫衰减系数的透明度反演方法,该方法的核心是 Lee 等^[16-17]创建的 QAA (Quasi-Analytical Algorithm) 算法。魏国妹等^[18]和林法玲^[19]采用该算法分别反演了我国北部湾和台湾海峡西岸水体的透明度。本研究尝试采用该算法反演东中国海水体的透明度。由于该算法较为复杂,下面给予详细介绍。

Tyler^[14]和 Preisendorfer^[15]提出,光在均匀介质中传播时,垂直方向上的透明度可以表达为:

$$SDD = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)}{K_d(v) + c(v)} \quad (2)$$

式中: SDD 为透明度; C₀ 表示透明度盘与背景水体的固有对比度; C_{min} 表示能被人眼识别的最小表观对比度; K_d(v) 为可见光的垂直衰减系数; c(v) 是可见光的光束衰减系数。根据 Preis-

endorfer^[15]的观测, $\ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)$ 是一个变化范围在 5 ~ 10 之间的常数,它受透明度盘和背景水体的反射率以及 C_{min} 的影响。Morel 等^[20]通过对 1900 ~ 1991 年间的 108323 个观测数据分析发现, $\ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)$ 的最佳取值为 5.5, 本文亦取该值参与透明度的计算。

Doron 等^[13]研究表明, K_d(v) + c(v) 与 K_d(490) + c(490) 高度相关,可用二次多项式来拟合二者的关系,模型的决定系数高达 0.99,见下式:

$$K_d(v) + c(v) = 0.0989x^2 + 0.8879x - 0.0467 \quad (3)$$

式中: x 表示 K_d(490) + c(490)。K_d(490) 是 490 nm 处水体总的吸收系数 a(490) 和后向散射系数 b_b(490) 的函数^[21],可由下式表示:

$$K_d(490) = a(490) + 3.47 \times b_b(490) \quad (4)$$

c(490) 是 490 nm 波段水体的总吸收系数 a(490)、颗粒物后向散射系数 b_{bp}(490) 和纯水的散射系数 b_w(490) 的函数^[18, 22-23],可由下式表示:

$$c(490) = a(490) + b_{bp}(490) / 0.02 + b_w(490) \quad (5)$$

式(4)和(5)中的 a(490)、b_b(490) 和 b_{bp}(490) 可由 QAA 算法求出, b_w(490) 为 0.0031/m^[24]。

由以上分析可知,只要由 QAA 算法求出 a(490)、b_b(490) 和 b_{bp}(490),便可计算水体透明度 SDD。目前, QAA 算法已发展到第五版^[17],参考波长可选用 550 nm、555 nm 或 560 nm,本文选用 555 nm 作为参考波长, QAA 算法计算流程如表 3 所示,计算得到的透明度与实测值的对比如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在东中国海区域,对于本研究数据来说,基于 QAA 算法由遥感反射率获取水体的固有光学参数,再将其带入到 Doron 等^[13]透明度计算公式的半分析算法,其反演得到的透明度与实测值的平均相对误差为 78.4%,最大相对误差为 243.3%,最小相对误差为 7.04%,均方根误差为 8.48 m。显然,半分析算法的反演效果与经验算法相比,并不理想,这与 Doron 等^[25]的研究结果相一致,即对于水体透明度的遥感反演,半

分析算法的精度不如经验算法。尽管半分析算法多参数的输入,并不总是优于经验算法^[28],因此在反演水体组分方面是有用的^[26-27],但其需要较多参数的输入,目前经验法仍是透明度遥感反演的主要方法。

表3 555 nm 作为参考波长的 QAA 算法步骤

Tab.3 Steps of the QAA to Drive Absorption and Backscattering Coefficients from Remote-Sensing Reflectance with 555 nm as the Reference Wavelength

步骤	估算量	计算方法	获取方法
1	r_{rs}	$= R_{rs} / (0.52 + 1.7R_{rs})$	半分析
2	$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$	$= \frac{-g_0 + [g_0^2 + 4g_1 r_{rs}]^{1/2}}{2g_1}$ $g_0 = 0.089 \quad g_1 = 0.125$ $= a_w(555) + 10^{-1.146 - 1.366\chi - 0.469\chi^2}$	半分析
3	$a(555)$	$\chi = \log\left(\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(555) + 5 \frac{r_{rs}(667)}{r_{rs}(490)} r_{rs}(667)}\right)$	经验
4	$b_{bp}(555)$	$= \frac{u(555) a(555)}{1 - u(555)} - b_{bw}(555)$	分析
5	η	$= 2.0 \left[1 - 1.2 \exp\left(-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)}\right) \right]$	经验
6	$b_{bp}(\lambda)$	$= b_{bp}(555) \left(\frac{555}{\lambda}\right)^\eta$	半分析
7	$a(\lambda)$	$= \frac{[1 - u(\lambda)] [b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)]}{u(\lambda)}$	分析

注: $a_w(555) = 0.0596$ ^[29]

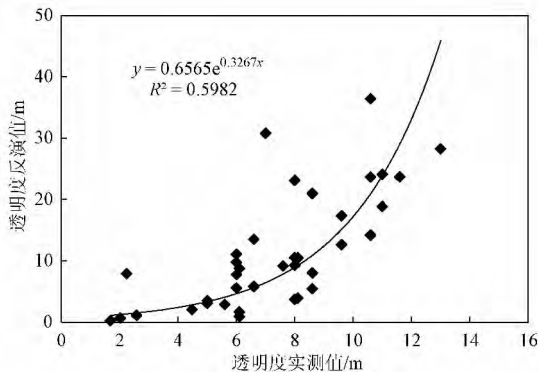


图4 半分析算法反演得到的透明度与实测值的对比

Fig.4 Comparison between Measured and Retrieved SDD Using the Semianalytical Algorithm

3 结论

2009年5月15~31日和2009年6月15~20日,在黄东海区域进行了两个航次的透明度观测,通过与近实时的MODIS遥感反射率数据时空匹配,分别采用经验算法和半分析算法对透明度

估测模型进行研究。结果表明,经验算法优于半分析算法,其中三波段模型是最优的,反演值与实测值之间的平均相对误差为19%、决定系数为0.719、均方根误差为1.47 m。

本研究可为大面积遥感监测黄东海透明度奠定基础,并为多途径提取海水透明度提供一种思路,但二类水体的光学特性是比较复杂的,同时限于样点的分布和采样时间季节,模型的通用性有待验证,这需要在以后的工作中继续深入研究。

参考文献:

[1] LAVERY P, PATTIARATCHI C, WYLLIE A. Water quality monitoring in estuarine waters using the Landsat Thematic Mapper [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 46 (3): 268-280.
 [2] DEKKER A, PETERS S. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14 (5): 799-821.
 [3] OLMANSON L G, BAUER M E, BREZONIK P L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10 000 lakes [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112 (11): 4086-4097.

- [4] BAILEY S W ,FRANZ B A ,WERDELL P J. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing[J]. *Optics Express* 2010 ,18 (7) :7521-7527.
- [5] GOYENS C ,JAMET C ,SCHROEDER T. Evaluation of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2013 ,131: 63-75.
- [6] SON S ,WANG M. Water properties in Chesapeake Bay from MODIS-Aqua measurements [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2012 ,123: 163-174.
- [7] 邢前国 ,郝向阳 ,施平 ,等. 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测[J]. *光谱学与光谱分析* 2011 ,31(6) : 1644-1647.
- [8] FLEMING-LEHTINEN V ,LAAMANEN M. Long-term changes in Secchi depth and the role of phytoplankton in explaining light attenuation in the Baltic Sea[J]. *Estuarine ,Coastal and Shelf Science* 2012 ,102-103: 1-10.
- [9] 王晓梅 ,唐军武 ,丁静. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究[J]. *海洋学报* 2005 27 (5) : 38-45.
- [10] 丛丕福 ,曲丽梅 ,韩庚辰. 辽东湾海水透明度的遥感估算模型[J]. *地球科学进展* 2011 26 (3) : 295-299.
- [11] KOPONEN S ,PULLIAINEN J ,KALLIO K. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data [J]. *Remote Sensing of Environment* 2002 , 79 (1) : 51-59.
- [12] TASSAN S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton ,pigments ,suspended sediment ,and yellow substance in coastal waters [J]. *Applied optics* ,1994 ,33 (12) : 2369-2378.
- [13] DORON M ,BABIN M ,MANGIN A. Estimation of light penetration and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research* 2007 ,112(C6) : C06003.
- [14] TYLER J E. The Secchi disc [J]. *Limnology and Oceanography* , 1968 ,VIII (1) : 1-6.
- [15] PREISENDORFER R W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters [J]. *Limnology and Oceanography* ,1986 ,31(5) : 909-926.
- [16] LEE Z P ,CARDER K L ,ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied optics* ,2002 ,41 (27) : 5755-5772.
- [17] LEE Z P ,LUBAC B ,WERDELL J. An Update of the Quasi-Analytical Algorithm(QAA_V5) [EB/OL]. http://www.ioceg.org/groups/Software_OCA/QAA_v5.pdf 2009.
- [18] 魏国妹 ,商少凌 ,李忠平. 基于固有光学特性的北部湾透明度遥感反演及其检验 [J]. *高技术通讯* ,2009 ,19 (9) : 977-982.
- [19] 林法玲. 1998 ~ 2010 年夏季台湾海峡西部沿岸海水遥感透明度的年际变化 [J]. *台湾海峡* 2012 31 (3) : 301-306.
- [20] MOREL A ,HUOT Y ,GENTILI B. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach [J]. *Remote Sensing of Environment* 2007 ,111 (1) : 69-88.
- [21] LEE Z P ,DU K P ,ARNONE R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. *Journal of Geophysical Research* 2005 ,110 (C2) : C02016.
- [22] GORDON H R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? [J]. *Limnology and Oceanography* ,1989: 1389-1409.
- [23] MOBLEY C D ,MOBLEY C D. Light and water: Radiative transfer in natural waters[M]. Academic press San Diego ,CA: 1994.
- [24] SMITH R C ,BAKER K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) [J]. *Applied optics* ,1981 ,20 (2) : 177-184.
- [25] DORON M ,BABIN M ,HEMBISE O ,et al. Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS ,MODIS and SeaWiFS data [J]. *Remote Sensing of Environment* 2011 ,115(12) : 2986-3011.
- [26] HE M X ,LIU Z S ,DU K P. Retrieval of chlorophyll from remote-sensing reflectance in the China seas [J]. *Applied optics* 2000 , 39 (15) : 2467-2474.
- [27] MARITORENA S ,SIEGEL D A ,PETERSON A R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications [J]. *Applied optics* 2002 ,41 (15) : 2705-2714.
- [28] O'REILLY J E ,MARITORENA S ,MITCHELL B G. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans* ,1998 ,103 (C11) : 24937-24953.
- [29] POPE R M ,FRY E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [J]. *Applied optics* ,1997 ,36 (33) : 8710-8723.